

## 上海地区第⑤<sub>2</sub>层砂质粉土的液化特性试验研究

黄雨<sup>1,2</sup>, 金晨<sup>1</sup>, 庄之敬<sup>1</sup>, 郑永来<sup>3</sup>

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;  
3. 同济大学 水利工程系, 上海 200092)

**摘要:** 针对目前上海地区第⑤<sub>2</sub>层砂质粉土的液化特性尚缺乏研究的实际问题, 结合上海某电厂海底隧道的工程实例, 基于动三轴试验, 对场地内第⑤<sub>2</sub>层土体动力特性进行研究. 内容包括往返作用力、固结压力、结构性、颗粒组成等因素对于液化特性的影响, 确定了场地内饱和粉性土的抗液化强度指标等. 通过 Seed 简化法, 判别该土层地震液化可能性, 给工程场地抗震设计及液化防治提供了科学依据, 同时对类似工程的可液化场地处理可以有良好的借鉴.

**关键词:** 砂质粉土; 液化特性; 试验研究; 动三轴试验; 抗震设计

**中图分类号:** TU 43

**文献标识码:** A

### Experimental Research on Liquefaction Characteristics of Sandy Silt Layer ⑤<sub>2</sub> in Shanghai

HUANG Yu<sup>1,2</sup>, JIN Chen<sup>1</sup>, ZHUANG Zhijing<sup>1</sup>, ZHENG Yonglai<sup>3</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Department of Hydraulic Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Based on a case study of underground projects at a power station in Shanghai area, the researches on the dynamic characteristics of liquefiable sandy silt are conducted by means of dynamic triaxial tests with a consideration of such influencing factors on liquefaction as cyclic stress, consolidation pressure, structure, particle composition and parameters for liquefaction evaluation are obtained. The seed simplified method is adopted to verify the results of the laboratory method. Some scientific conclusions on earthquake resistant design of this project are proposed and can be referred to the similar engineering projects of ground

improvement for liquefaction mitigation.

**Key words:** sandy silt; liquefaction characteristics; experimental research; dynamic triaxial tests; earthquake resistant design

地基液化是一种严重的自然灾害. 为消除液化危害, 桩基、箱基、置换、地基处理等措施得到了广泛应用<sup>[1-2]</sup>, 对液化机理, 国内外学者也广为关注和研究. 一直以来, 饱和可液化土体的振动液化是抗震工程的重要组成部分. 1976年唐山丰南地震时, 天津地区发生了大面积粉性土的地基液化现象<sup>[3]</sup>; 1999年台湾省花莲西南发生的7.6级地震中, 细粒粉土也出现了局部液化<sup>[4]</sup>. 上述地震实例的调查研究表明, 饱和粉土同砂土一样会液化, 因此, 饱和粉土的振动液化的预测逐渐成为土动力学与土工抗震研究中的一个重要课题. 这些研究主要集中在振动液化产生的机理、条件、影响因素、抗液化强度的确定及液化产生的可能性等方面<sup>[5-6]</sup>.

上海地区广泛分布着第⑤<sub>2</sub>层灰色砂质粉土, 地质年代属于全新世Q<sub>4</sub>, 为滨海沼泽成因类型, 顶面埋深为29~30 m. 由于上海地区第⑤<sub>2</sub>层土的埋深通常大于现行岩土工程勘察规范规定的液化判别深度15~20 m, 所以, 迄今对其的液化特性研究较少, 该方面文献鲜见报道. 而笔者由勘测结果发现, 由于上部土层的剥蚀, 上海某电厂海底隧道场地第⑤<sub>2</sub>层土的平均埋深仅为9 m左右, 需要判别液化的可能性. 鉴于此, 结合实际工程, 选择场地的第⑤<sub>2</sub>层土作为研究对象, 通过动三轴试验, 对场地的可液化土层首次进行动力特性研究, 给工程场地抗震设计及液化防治提供科学依据.

收稿日期: 2008-10-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40841014, 40802070); 上海市重点学科建设资助项目(B308)

作者简介: 黄雨(1973—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为地震工程地质与数值模拟. E-mail: yhuang@tongji.edu.cn

## 1 试验方案

### 1.1 工程概况及工程地质条件

将工程现场钻孔所取土样,经现场蜡封后,送至试验室进行土工试验.取土地点如图1所示.



图1 取土地点示意图

Fig.1 Location of soil sampling

某电厂海底隧道工程的场地位于杭州湾北岸,场地地貌单元属潮坪或滨海平原交替区,主要沉积的土层为河口—滨海及浅海—滨海相土层.地质构造见图2所示.根据前期勘察结果,场地地基范围内部分地区(水下18 m深度内)⑤<sub>2</sub>层饱和砂质粉土埋深较浅,于是,对1.6 km长的场地钻取不同地段的砂质粉土,研究其动力特性及液化可能性.

全新世Q <sub>4</sub>	③ <sub>1</sub> 层灰色粉质粘土,夹粉土或粉砂薄层	0.6~6.5
	③ <sub>2</sub> 层灰色粘质粉土,夹粘性土或粉砂薄层	3.3~7.9
	④ <sub>1</sub> 层灰色淤泥质粘土,夹粉土或粉砂薄层	6.5
	④ <sub>2</sub> 层灰色淤泥质粉质粘土,夹粉土或粉砂薄层	5.7~9.6
	⑤ <sub>1</sub> 层灰色砂质粉土,夹粘性土薄层及少量贝壳	1.6~12.3
上更新世Q <sub>3</sub>	⑥层绿色粉质粘土	1.1~2.1
	⑦ <sub>1</sub> 层灰色—灰黄色砂质粉土,局部夹粉砂和粘性土薄层	4.5~11.75
	⑦ <sub>2</sub> 层灰色粉细砂,局部夹薄层粉性土	>15.0

图2 场地地质剖面图(单位:m)

Fig.2 Geological profile in the site(unit:m)

### 1.2 试验仪器

试验在同济大学岩土及地下工程教育部重点实

验室进行,仪器为美国产C.K.C循环三轴仪(见图3),属单向激振的循环三轴仪.激振力频率可根据要求调节,属应力控制,激振力最大为2.5 kN,最大围压1.2 MPa,试样直径、高度分别为39.1,80.0 mm.



图3 C.K.C循环三轴仪

Fig.3 C.K.C dynamic triaxial test system

### 1.3 土样制备

土样物性指标如表1所示.采用标准方法,将原状土切成所需制备的试样数.将等份后的原状土放入切土器中切削.完成后,土样装入半开模,称重、记录、装样、贴标签.将切削下的余土装入试样盒,称重、记录、烘干,测含水率.

扰动样的制作参照《土样和试样制备》(SL237—2002—1999)<sup>[7]</sup>.将一定量的土样放入烘箱烘干10 h以上,烘干的土样用研钵碾散,用0.5 mm孔径细筛过筛.过程中控制干密度,用天平称取所需土的质量,调配适量的水做成试样.称取等质量土样6份,用击实器分6层填入土样模中,击实,各份试样的密度差值小于 $0.02 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ .用半开模把试样套入橡皮膜,然后,将装有试样的饱和器浸没于抽气饱和和机中,准备固结.

### 1.4 试验控制条件

以固结不排水的试验条件,对试样采取抽气饱和法进行饱和,将其装入带有清水注入的饱和缸内,连续真空抽气2 h,然后停止抽气,静置10 h,待饱和之后试验.依次采用等向及不等向的固结方法.当采用不等向固结时,在试样等向固结完成之后再施加偏应力,当孔隙水压随时间趋于稳定时,可以认为固结完成.施加频率为1 Hz的正弦波.采用双幅应变 $\epsilon_f = 5\%$ 时作为液化标准.从工程实用观点,以变形定义液化标准更为可取,特别是对饱和的密实土,以达到指定应变作为液化标准更为适宜<sup>[8]</sup>.选用同一密度的3个试样,用相同的围压(本次试验选用50, 100, 150 kPa),以不同的振动破坏周次(10, 30, 100周左右)进行试验,分别做10组.试验过程均按照中华人民共和国行业标准《振动三轴试验》(SL237—

032—1999)<sup>[7]</sup>进行.

表1 砂质粉土颗粒成分及物理力学性质指标

Tab.1 Particle composition, physical and mechanical properties of sandy silt

颗粒组成(质量分数)/%			天然状态下的物理性质指标					固快直剪		固结	
砂, 粒径 0.25~0.074 mm	粉粒, 粒径 0.074~0.005 mm	粘粒, 粒径 小于 0.005 mm	密度 $\rho_0 / (g \cdot cm^{-3})$	相对密度 $G$	孔隙比 $e_0$	饱和度 $S_r / \%$	塑性指数 $I_p$	粘聚力 $c / kPa$	内摩擦角 $\phi / (^\circ)$	压缩系数 $\alpha / MPa^{-1}$	压缩模量 $E_s / MPa$
27.5	65.8	6.7	1.87	2.7	0.94	95	9.4	14	30	0.15	13.2

## 2 饱和粉土液化影响因素分析

### 2.1 往返作用力的影响

从试验结果(图 4a, b)对比分析可知:随着往返

作用力的增大,应变增长的速率得到很大提高,液化所需的时间明显缩短,孔压从持续增长至增长逐渐减缓的两个阶段,变为几乎呈线性增长一个阶段.

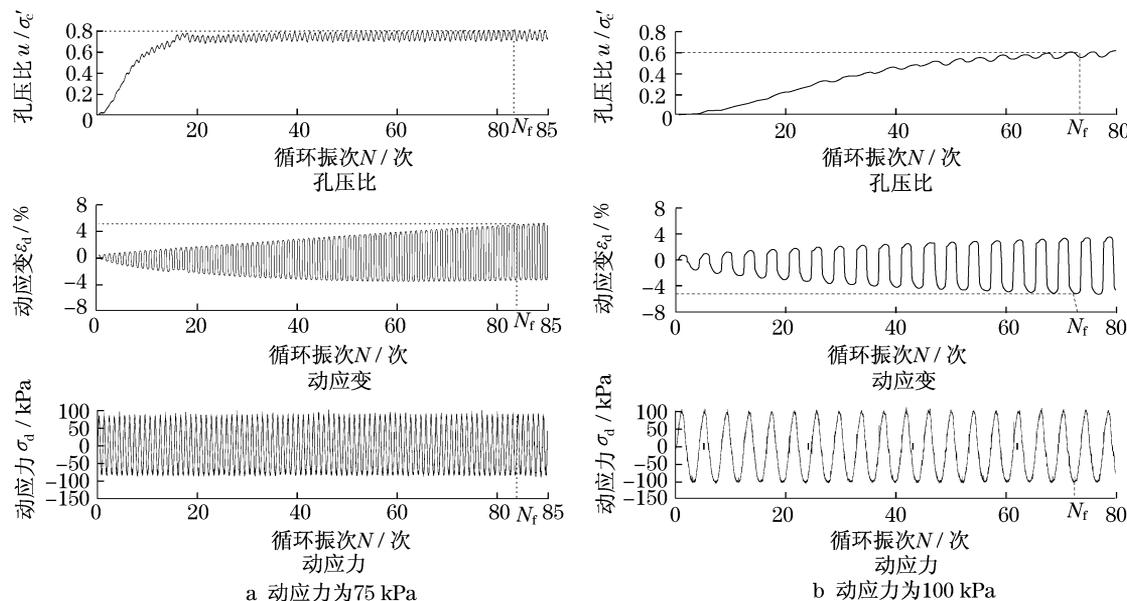


图4 不同动应力时,应力、应变、孔隙水压力随循环振次的变化

Fig.4 Relationship between stress, strain, pore water pressure and cycles of load

### 2.2 固结压力的影响

试验结果表明:⑤<sub>2</sub>层砂质粉土在相同的液化振次  $N_f$  作用下,液化所需的动应力  $\sigma_d$  随围压的增大而升高.如图 5 所示.

对集中在一个条带内,而且在相同的振次  $N_f$  时,随固结压力的增大而升高.

值得注意的是,此次试验中当固结压力较小(50 kPa)时,固结压力对液化状态的动剪应力比  $\sigma_d/2\sigma'_0$  影响较大,与其他两根曲线偏离较大.笔者认为,由于饱和和重塑土样在围压较低时孔隙较大,因此,振动的破坏作用更明显.

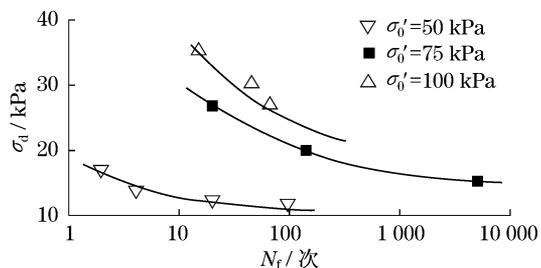


图5  $\sigma_d-N_f$  曲线

Fig.5 Curves of dynamic strength-cycles of load

当将固结压力  $\sigma'_0$  归一化后,从图 6 可以发现,不同固结压力下的动剪应力比  $\sigma_d/2\sigma'_0-N_f$  曲线相

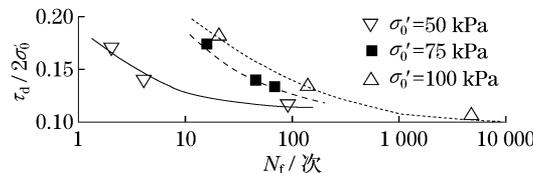


图6  $\sigma_d/2\sigma'_0-N_f$  曲线

Fig.6 Curves of cyclic stress ratios-cycles of load

### 2.3 土结构的影响

土的结构对粉性土液化强度的影响不容忽视. 文献[9]讨论了土结构对粉性土动力学特性的影响, 指出重塑土改变了土的原状结构, 使得强度降低.

通过⑤<sub>2</sub>层砂质粉土重塑样与原状样的对比分析, 发现原状土的动剪应力比( $\sigma_d/2\sigma'_v$ )比重塑土的动剪应力比提高近 100%. 可见, 土的结构对土的抗液化强度的影响. 如图 7 所示.

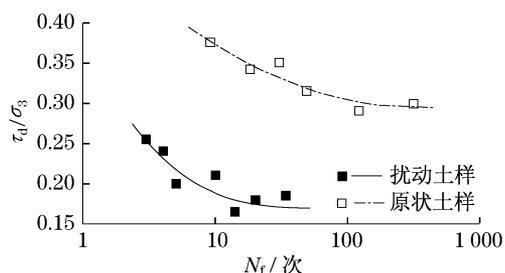


图 7 砂质粉土层原状、重塑土样抗液化强度比较

Fig. 7 Comparison of liquefaction strength between undisturbed soil and remoulded soil in sandy silt layer

### 2.4 颗粒组成的影响

颗粒组成的不同, 对粉性土的液化强度有着不容忽视的影响. Polito<sup>[10]</sup>等用循环三轴试验研究了砂中粉土对抗液化强度的影响. 结果表明, 当粉土包围在砂土骨架中, 抗液化强度由其相对密度决定, 且与粉土含量无关; 如果砂粒包围在粉土中, 抗液化强度也由相对密度控制, 但在相同的密度条件下, 抗液化强度较低. 从表 2 可以发现, 本次试验中第⑤<sub>2</sub>层砂质粉土粘粒的质量分数大致相当(约 7%), 砂粒质量分数小于 44%, 粉粒体积分数在 48.5%~76.9%. 研究结果表明, 原状砂质粉土在粘粒体积分数相当时, 随着粉粒含量的大量增加, 土颗粒的平均粒径逐渐减小, 颗粒组成更加均匀. 在动力荷载作用下, 砂质粉土的抗液化强度逐渐降低. 该趋势基本符合 Polito 给出的第二种情况<sup>[10]</sup>. 由于本设计按照 7.0

表 2 砂质粉土颗粒组成与抗液化强度关系

Tab. 2 Relationship between particle composition and liquefaction strength of sandy silt

土样深度/ 编号 m	颗粒组成(质量分数)%			$N_{12}$	土样
	砂, 粒径 0.25~ 0.075 mm	粉粒, 粒径 0.075~ 0.005 mm	粘粒, 粒径小于 0.005 mm		
1 17.0	15.0	76.9	8.1	0.14	重塑土
2 12.0	44.0	48.5	7.5	0.38	原状土
3 12.0	36.5	57.1	6.4	0.37	原状土
4 12.0	33.0	60.3	6.7	0.25	原状土
5 12.0	21.0	70.3	8.7	0.24	原状土
6 9.0	27.5	65.8	6.7	0.27	原状土

级地震震级考虑, 故根据 Seed 等的建议<sup>[11]</sup>, 采用等效振次 12 次所对应的液化动剪应力比  $N_{12}$  作为抗液化强度<sup>[2]</sup>.

## 3 基于 Seed 简化法的液化判别

### 3.1 判别过程

将饱和液化土的动三轴强度试验的动剪应力比与等效平均剪应力对比, 判别液化. 该物理模型直观, 理论严谨, 已成为北美和世界上许多地区判别砂土液化的常用方法. 根据 Seed-Idriss 简化法<sup>[11-12]</sup>

$$\tau_c = 0.65 d_z \left( \sum \gamma_i h_i / g \right) a_{\max} \quad (1)$$

$$\tau_d = C_r (\sigma_d / 2\sigma_c)_{N_f} \sigma'_v \quad (2)$$

式中:  $\tau_c$  为等效平均剪应力;  $\tau_d$  为抗液化剪应力;  $d_z$  为地震剪应力修正系数,  $d_z = 1 - 0.013 3z$ ,  $z$  为砂柱深度;  $\gamma_i, h_i$  分别为第  $i$  层土的饱和重度和厚度;  $a_{\max}$  为水平最大加速度;  $(\sigma_d / 2\sigma_c)_{N_f}$  为由动三轴试验确定的土层液化剪应力比;  $C_r$  为土层液化剪应力的修正系数;  $\sigma'_v$  为土层的上覆有效压力.

符合下式条件的土判为液化土:

$$\tau_c > \tau_d \quad (3)$$

对于存在液化可能的地基土层, 利用动三轴试验的结果, 按比值  $\tau_d / \tau_{av}$  和液化土层的埋深来计算该地基的液化指数和等级. 液化指数定义为

$$I_{IE} = \sum_{i=1}^n \left( 1 - \frac{\tau_{di}}{\tau_{avi}} \right) d_i W_i \quad (4)$$

式中:  $I_{IE}$  为液化指数;  $\tau_{avi}, \tau_{di}$  分别为  $i$  点等效循环剪应力及抗液化剪应力, 当抗液化剪应力大于等效循环剪应力时, 两者比值为 1;  $d_i$  为  $i$  点所代表的土层厚度,  $m$ ;  $W_i$  为  $i$  点单位土层厚度的层位影响权函数值,  $m^{-1}$ .

判断液化等级:  $0 < I_{IE} < 5$ , 轻微液化;  $5 \leq I_{IE} < 15$ , 中等液化;  $I_{IE} \geq 15$ , 严重液化.

### 3.2 判别结果

地下水位埋深按零考虑, 地震基本烈度为 VII 度时, 对应地面最大加速度为  $0.10g$ .

在抗震设防烈度 VII 时, 通过对不同试验点土样的抽样考察与对比, 查明场地中第⑤<sub>2</sub>层砂质粉土层的局部区域具轻微至中等液化可能, 主要集中在深度 9, 17 m 处. 与室内试验相对应, 本工程还通过标准贯入试验(SPT), 判别了该场地第⑤<sub>2</sub>层砂质粉土层的液化可能性. 在 20 个钻孔的 SPT 液化判别试验结果中, 5 个判液化, 其余 15 个均为不液化. 液化土层的空间分布位置与基于 Seed 简化法的室内试验

液化判别结果基本一致.有关 SPT 试验的详细结果,可参阅文献[13].

表3 Seed简化法判别液化结果

Tab.3 Results of the liquefaction evaluation by the seed simplified method

土样编号	水底以下深度/m	应力校正系数	$\left(\frac{\sigma_d}{2\sigma_c}\right)_{N_f}$	上覆有效应力/kPa	地震剪应力/kPa	液化剪应力/kPa	液化判别	液化指数 $I_{IE}$	液化等级
1	17.0	0.57	0.17	136	15.39	13.18	液化	0.4	轻微
2	12.0	0.57	0.41	96	11.79	22.44	不液化	—	—
3	12.0	0.57	0.39	96	11.79	21.34	不液化	—	—
4	12.0	0.57	0.25	96	11.79	13.68	不液化	—	—
5	12.0	0.57	0.24	96	11.79	13.13	不液化	—	—
6	9.0	0.57	0.16	72	9.27	6.57	液化	5.0	中等

## 4 结论

(1) 在循环振动过程中,随着往返作用力的增大,应变增长的速率显著提高,液化所需时间明显缩短.

(2) 初始固结压力对饱和粉性土的液化特性影响主要体现在:动强度  $\sigma_d/2$  随初始固结压力的增大而提高.当将初始固结压力  $\sigma'_0$  归一化后,不同固结压力下的动剪应力比  $\sigma_d/2\sigma'_0-N_f$  曲线相对集中在一个条带内;在相同的振次  $N_f$  时,动剪应力比  $\sigma_d/2\sigma'_0$  随固结压力的增大而提高.

(3) 试样的颗粒组成、结构性不同,表现出的抗液化能力也不同.即粉粒含量占主导地位时,颗粒平均粒径  $D_{50}$  越大,原状结构越好,粉性土越不容易液化.

(4) 经 Seed 判别法发现,场地中第⑤<sub>2</sub>层可液化砂质粉土局部具轻微至中等液化可能.在该粉土层中建造地下工程,应按实际工况复核,必要时采用加固措施.

## 参考文献:

- [1] 刘颖,谢君斐.砂土震动液化[M].北京:地震出版社,1984.  
LIU Ying, XIE Junfei. Sandy soil seismic liquefaction [M]. Beijing: Seismology Press, 1984.
- [2] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].北京:水利电力出版社,1996.  
QIAN Jiahuan, YIN Zongze. Geotechnical principle and calculation[M]. Beijing: China Water Power Press, 1996.
- [3] 石兆吉,郁寿松,王余庆,等.饱和轻亚粘土地基液化可能性判别[J].地震工程与工程振动,1984,4(3):71.  
SHI Zhaoji, YU Shousong, WANG Yuqing, et al. The liquefaction possibility discrimination of saturated light mild clay [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1984, 4(3): 71.
- [4] Hwang J H, Yang C W. Verification of critical strength curve by Taiwan Chi earthquake data[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2001, 21(3): 237.
- [5] 谢定义.饱和砂土体液化的若干问题[J].岩土工程学报,1992,14(3):90.  
XIE Dingyi. Some problems about liquefaction of saturated sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(3): 90.
- [6] 李立云,崔杰,景立平,等.饱和粉土振动液化分析[J].岩土力学,2005,26(10):1663.  
LI Liyun, CUI Jie, JING Liping, et al. Study on liquefaction of saturated silty soil under cyclic loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(10): 1663.
- [7] 中华人民共和国水利部. SL237—1999 土工试验规程[S].北京:中国水利水电出版社,1999.  
Ministry of Water Resources P R C. SL237—1999 Specification of soil test[S]. Beijing: China Water Power Press, 1999.
- [8] 于濂洪,王波.饱和粉土振动孔隙水压力的试验研究[J].大连大学学报,1999,20(4):59.  
YU Lianhong, WANG Bo. Study on pore water pressure of saturated and disturbed sandy loam during cyclic loading [J]. Journal of Dalian University, 1999, 20(4): 59.
- [9] 林霖.现代黄河水下三角洲粉土动力特性及液化破坏研究[D].青岛:中国海洋大学海洋地球科学学院,2003.  
LIN Lin. Research on dynamic property and liquefaction related damages of silt in modern yellow river submarine delta [D]. Qingdao: Ocean University of China. College of Marine Geosciences, 2003.
- [10] Polito C P, Martin J R. Effects of nonplastic fines on the liquefaction resistance of sands[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(5): 408.
- [11] Seed H B, Idriss I M, Arango I. Evaluation of liquefaction potential using field performance data [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1983, 109(3): 458.
- [12] 《工程地质手册》编委会.工程地质手册[M].4版.北京:中国建筑工业出版社,2007.  
The editorial board of the engineering geology manual. The Engineering Geology Manual [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2007.
- [13] 庄之敬.可液化土的地震液化试验及数值模拟研究[D].上海:同济大学土木工程学院,2008.  
ZHUANG Zhijing. Numerical simulation and experimental research on liquefiable soils during earthquakes [D]. Shanghai: Tongji University. School of Civil Engineering, 2008.